

ANDRZEJ KOSS*, JAN MARCZAK**

CHARAKTERYSTYKA STANÓW POWIERZCHNI
PRZED, PODCZAS I PO OCZYSZCZANIU
IMPULSOWYM PROMIENIOWANIEM LASERASURFACE STATE CHARACTERISTICS BEFORE, DURING
AND AFTER CLEANING UP BY PULSED LASER RADIATION

Streszczenie

Konserwacja bezcennych obiektów jest procesem dostarczającym konserwatorom wielu trudnych zagadnień komplementarnych, a ich oczyszczanie jest jednym z krytycznych etapów tego procesu. Ogromna różnorodność rodzaju nawarstwień, jak również szeroki wachlarz wyboru parametrów wiązki laserowej (długości fali, gęstości energii), dostarcza jedynej w swoim rodzaju najwzszechstronniejszej, jak do tej pory technologii usuwania nawarstwień obcych z dzieł sztuki i z obiektów architektonicznych. Laserowa technika usuwania warstw wierzchnich – zanieczyszczających powierzchnię dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze (np. nawarstwień, przemalowań, pożółkłych werniksów lub czarnych skorup) za pomocą promieniowania laserowego jest metodą nowoczesną. Oferuje ona szereg niespotykanych do tej pory zalet w porównaniu do metod tradycyjnych (mechanicznych i chemicznych). Zebrane dane stanowią bazę służącą do porównań zachowania się barw trakcie następnych sesji pomiarowych w latach przyszłych, a także do dalszych porównań w miarę upływu czasu.

Słowa kluczowe: oczyszczanie, promieniowanie laserowe, dzieła sztuki, obiekty zabytkowe

Abstract

Conservation of invaluable objects is the process that involves many complementary questions that need to be solved and cleaning up constitutes one of the critical stages of that process. Laser based technique of removing the external layers polluting the surfaces of works of art or historical objects in architecture (deposits, repainted fragments, yellowed varnishes, black incrustations) is very effective, modern method. It offers several unparalleled up to present advantages in comparison to traditional methods (mechanical, chemical).

In practice, most cases are complicated objects with complex technology and individual state of maintenance, being the result of many different factors and changes within the materials used. That is why the traditional techniques application is restricted in situations where each detail requires different parameters of cleaning up. Specific laser features, decrease in the cost of their usage and reduction in dimensions of laser system equipment led to the increasing applications of these techniques in conservation works in the recent years.

Keywords: cleaning up, laser radiation, works of art, historical objects

** Dr hab. inż. – Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej - Warszawa

1. Wstęp

Po ponad 30 latach od pierwszej próby [1], laserowe oczyszczanie powierzchni przestało być laboratoryjną ciekawostką i stało się dojrzałym procesem technologicznym, szeroko stosowanym w przemyśle elektronicznym, lotniczym, jądrowym, a także w konserwacji dzieł sztuki [2-5]. Dostępne do niedawna metody oczyszczania powierzchni w konserwacji opierały się o mechaniczne lub chemiczne techniki, wybierane zwykle przez indywidualnego konserwatora. Tradycyjne techniki czyszczenia w praktyce bardzo trudno się kontroluje. Zastosowanie techniki laserowej daje w praktyce możliwości pełnej kontroli procesu usuwania nawarstwień [6]. Bezdotykowe, selektywne i precyzyjne działania wiązki światła stanowią podstawowe zalety bez – inwazyjnego działania na nawarstwienia mniej lub ściślej przylegające do powierzchni dzieła. W procesie „obróbki” różnych materiałów i usuwania ich warstw wierzchnich, wykorzystuje się impulsową laserową ablację. Pojęcie „ablacja laserowa” oznacza usuwanie warstw wierzchnich materiałów o kontrolowanej grubości, w wyniku absorpcji impulsowego promieniowania laserowego, szybkiego nagrzania i odparowania warstwy wierzchniej.

W praktyce konserwatorskiej najczęściej spotykamy wiele skomplikowanych obiektów o szczególnie złożonej budowie technologicznej i indywidualnym stanie zachowania wynikającym z wpływu różnorodnych czynników i zmian w samym budulcu użytym do ich wykonania. Ogranicza to często możliwość zastosowania metod konwencjonalnych, a każdy detal wymaga odrębnych ustalonych parametrów czyszczenia. Specyficzne właściwości laserów, coraz niższe koszty urządzeń i zmniejszanie rozmiarów różnych systemów laserowych doprowadziły do ich wzrastającego zastosowania w konserwacji w ostatnich dziesięciu latach.

2. Konieczność badań naukowo – przyrodniczych

Oczyszczanie promieniami lasera powierzchni obiektu, z zamiarem uzyskania poprawy stanu powierzchni, prowadzi do zmiany jej barwy. Poprawa, do której dążymy, może być natury estetycznej i/lub fizycznej. Na przykład wraz ze zdjęciem warstwy wierzchniej (czarnej skorupy lub mikronowej grubości zabrudzeń) zmieniony zostaje zarówno wizerunek estetyczny powierzchni jak również zwiększa się przepuszczalność powierzchni wobec przyjmowania środków konserwujących. Aby móc ocenić rezultat i ewentualnie sterować nim jeszcze podczas procesu oczyszczania względnie zoptymalizować go, konieczne jest scharakteryzowanie powierzchni przed, podczas i po oczyszczeniu. Ponieważ ekspertyza wizualna rozpoznaje tylko bardziej intensywne zmiany kolorystyczne i morfologiczne i opisuje je subiektywnie, trzeba dodatkowo zastosować obiektywne procesy pomiarowe, które umożliwiają kwantyfikację zmian w odniesieniu do stanu wyjściowego na podstawie konkretnych danych liczbowych.

Poprzez pomiary na powierzchniach wzorcowych względnie na oczyszczonym obiekcie można obiektywnie zdefiniować stopień oczyszczenia, kontrolować wykonanie oczyszczania oraz długoterminowe zachowanie oczyszczonych powierzchni.

Obok aspektu dokumentacyjnego podnieść należy także aspekt naukowo-przyrodniczy badań przy oczyszczaniu promieniami lasera. Dopiero odpowiedzi na pytania o odpowiednią długość fal, konieczną gęstość energii dla usunięcia określonej warstwy brudu i o osiągalną prędkość oczyszczania dopuszczają rozsądne planowanie środków z wyborem odpowiedniego urządzenia laserowego i kalkulację kosztów lub ewentualnie możliwych innych metod alternatywnych. Jednocześnie jako efekt uboczny badania te mogą dostarczyć wiedzy o przyczynach szkód i tym samym mogą dać ważne wskazówki do zapobiegania przyszłym porównywalnym szkodom.

3. Pomiary barwy przed, w trakcie i po oczyszczeniu laserowym

To zasadniczy i nieodzowny pomiar obiektów poddanych procesowi restauracji. Przy szeregowaniu kolorów, wyrażamy ich właściwości za pomocą tonu (barwy), czystości (jasności) i nasycenia (jaskrawości). **Ton, czystość i nasycenie**, to trzy cechy opisujące świat barw. Wyznaczenie podziałek tonu, czystości i nasycenia stwarza możliwość cyfrowego - obiektywnego pomiaru barwy, a poza tym

określanie kolorów poprzez liczby jest bardzo wygodne. Metody przedstawiające kolor numerycznie były rozwijane przez międzynarodową organizację zajmującą się światłem i kolorem, the Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Dwie z najbardziej znanych metod to: przestrzeń barw Yxy wprowadzona w 1931 r. i oparta na modułach koloru XYZ zdefiniowanych przez CIE oraz przestrzeń barw $L^*a^*b^*$ wprowadzona w 1976 r. **Przestrzeń barw** wspomniane wyżej stosuje się obecnie na całym świecie do identyfikacji kolorów. Przestrzeń barw to metoda wyrażająca kolor przedmiotu lub źródła światła za pomocą szczególnego zapisu liczbowego. W tym artykule nie będziemy omawiać szczegółowo wspomnianych metod pomiaru barwy. Odsyłamy Szanownego Czytelnika do odpowiedniej, fachowej literatury. Przestrzeń barw $L^*a^*b^*$ (określana również jako CIELAB) jest obecnie jedną z najbardziej znanych, wykorzystywanych w pomiarze koloru przedmiotu i szeroko stosowaną w niemalże wszystkich dziedzinach. Przykładem niech będzie pomiar barwy oczyszczonego piaskowca przed, w trakcie i po oczyszczeniu impulsowym promieniowaniem laserowym) wystroju wewnętrznego Kaplicy Zygmuntowskiej i ściany tronowej wykonanej z wapienia w Kaplicy Batorego na Wawelu. Dodatkowym atrybutem jest zapis dokumentacyjny, umożliwiający za np. kilkadziesiąt lat powrót do tej samej barwy, jeśli konieczne będzie oczyszczenie tego samego obiektu np. pod wpływem starzenia się impregnatu. Nasze pomiary stanowią więc będą punkt odniesienia. Należy zaznaczyć, że wszystkie pomiary barwy przeprowadzono za pomocą spektrofotometru firmy Minolta, typu CM – 2600d, przy następujących ustawieniach: M / I + E / 100, 10° / D65. Pomiaru barwy dokonano w wielu miejscach, a w niniejszym artykule przedstawiono jedynie wyniki reprezentatywne. Wyniki pomiaru zapisane zostały we współrzędnych $L^*a^*b^*$ i przedstawione w tablicach i tak jak we wszystkich badaniach wyniki uśrednione są reprezentatywne.

3.1. Barwy kamienia myślenickiego w wystroju Kaplicy Zygmuntowskiej

Do wystroju Kaplicy Zygmuntowskiej Berrecci użył piaskowca myślenickiego barwy zielonej i zielono-popielatej, a także piaskowca o białym i kremowym zabarwieniu. Ponadto w trakcie dwóch poważnych renowacji w XVIII i XIX w. zastępowano kamień myślenicki piaskowcem szydlowieckim o zabarwieniu białym a także dwoma rodzajami wapienia: pińczowskiego i jurajskiego. Pomiaru barwy piaskowca myślenickiego dokonano w wielu miejscach, a reprezentatywny „odłamek” piaskowca przedstawiono na rys. 1, a reprezentatywne pomiary jego barwy podano w tabeli 1. Ujemne wartości współrzędnej a^* świadczą o zielonym zabarwieniu.

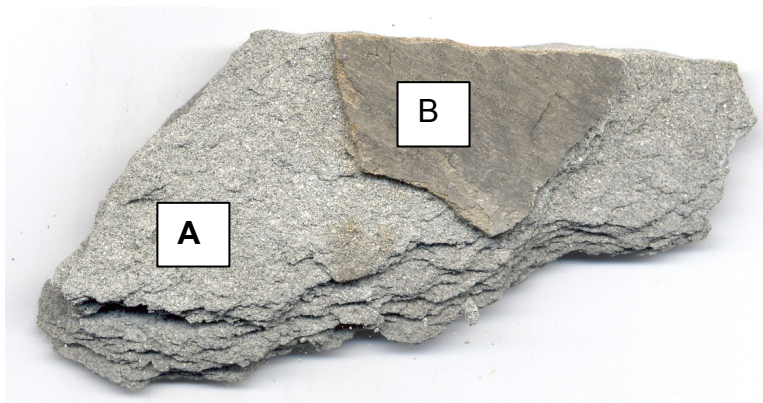
Tabela 1

Pomiary barwy wystroju kamiennego w Kaplicy Zygmuntowskiej

Barwa nawarstwienia na piaskowcu myślenickim przed procesem usuwania nawarstwień (punkt B)		Barwy piaskowca myślenickiego w przełomie (punkt A)	
SCI	SCE	SCI	SCE
$L^* = 52,24$	$L^* = 52,28$	$L^* = 47,30$	$L^* = 47,50$
$a^* = 0,58$	$a^* = 0,61$	$a^* = -3,22$	$a^* = -3,19$
$b^* = 10,12$	$b^* = 10,14$	$b^* = 6,84$	$b^* = 6,83$
Barwa piaskowca myślenickiego po oczyszczeniu laserem		Barwa wystroju kamiennego Kaplicy Zygmuntowskiej po scaleniu kolorystycznym	
SCI	SCE	SCI	SCE
$L^* = 48,47$	$L^* = 48,50$	$L^* = 53,21$	$L^* = 53,29$
$a^* = -2,0$	$a^* = -1,96$	$a^* = -1,75$	$a^* = -1,71$
$b^* = 6,28$	$b^* = 6,29$	$b^* = 7,11$	$b^* = 7,14$

Pomiar barwy piaskowca myślenickiego w przelomie i po zmoczeniu

Barwa piaskowca myślenickiego w przelomie i po zmoczeniu	
SCI	SCE
$L^* = 44,27$	$L^* = 44,34$
$a^* = -3,40$	$a^* = -3,37$
$b^* = 6,99$	$b^* = 6,99$



Rys. 1. Zdjęcie przedstawiające miejsca pomiarowe piaskowca myślenickiego
Fig. 1. Photograph showing measuring point of myślenice type sandstone

3.2. Barwy wapienia ściany tronowej w Kaplicy Batorego

Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcia ilustrujące proces oczyszczania ściany tronowej. Na górnej fotografii zilustrowano przeprowadzony standardowy test (widoczne siedem kwadratów) gęstości energii, wymaganej do bezpiecznego i pełnego usunięcia nawarstwienia obcego z płaskorzeźby wapiennej.

a)





Rys. 2. Ściana tronowa w Kaplicy Batorego na Wawelu w trakcie testów: Fot. J. Marczak.
a), b) przed oczyszczaniem c) po procesie oczyszczania promieniowaniem laserowym

Fig. 2. Throne wall in Batory Chapell on Wavel during tests:
a), b) before clearing up c) after clearing up with the use of laser radiation

W tabeli 3 przedstawiono pomiar barwy nawarstwienia na wapieniu pińczowskim przed czyszczeniem laserowym - pomiaru dokonano między 3 a 4 kwadratem oraz 5 a 6 licząc od dołu (rys. 2a).

T a b e l a 3

Pomiary barwy nawarstwienia przed oczyszczaniem

Pomiar barwy nawarstwienia na wapieniu pińczowskim przed czyszczeniem laserowym – pomiaru dokonano między 3 a 4 kwadratem		Pomiar barwy nawarstwienia na wapieniu pińczowskim przed czyszczeniem laserowym – pomiaru dokonano między 5 a 6 kwadratem	
SCI	SCE	SCI	SCE
$L^* = 35,50$	$L^* = 35,65$	$L^* = 44,51$	$L^* = 44,76$
$a^* = 1,91$	$a^* = 1,92$	$a^* = 1,85$	$a^* = 1,87$
$b^* = 8,62$	$b^* = 8,54$	$b^* = 8,87$	$b^* = 8,78$

Z kolei w tabeli 4 przedstawiono pomiar barwy wapienia pińczowskiego uzyskiwany w trakcie usuwania nawarstwienia promieniowaniem laserowym o zwiększającej się gęstości energii (dawce napromienienia). Od kwadratu Nr 1 do kwadratu Nr 7 (rys. 2) widzimy wzrost współrzędnej L^* w miarę wzrostu gęstości energii promieniowania laserowego.

T a b e l a 4

Pomiary barwy w trakcie i po oczyszczeniu laserem

Kwadrat 1	Kwadrat 2	Kwadrat 3	Kwadrat 4	Kwadrat 5	Kwadrat 6	Kwadrat 7
$L^* = 60,36$	$L^* = 63,05$	$L^* = 68,31$	$L^* = 72,28$	$L^* = 73,19$	$L^* = 78,24$	$L^* = 81,22$
$a^* = 3,52$	$a^* = 3,99$	$a^* = 3,69$	$a^* = 3,34$	$a^* = 3,28$	$a^* = 2,74$	$a^* = 2,12$
$b^* = 16,00$	$b^* = 17,78$	$b^* = 17,63$	$b^* = 17,48$	$b^* = 17,81$	$b^* = 17,88$	$b^* = 15,40$

Wizualne wrażenia jasności i zabarwienia powierzchni są zawsze subiektywne i dają się w niewystarczający sposób opisać w mowie. Poprzez pomiary barw za pomocą kolorymetru na powierzchniach wzorcowych podczas i po przeprowadzeniu oczyszczania promieniami lasera możliwe jest obiektywne porównanie różnych zabarwień, stwierdzenie kwantytatywnych zmian i dokładne zdefiniowanie celów oczyszczania.

Jako system pomiaru barwy w ramach programu badawczego, z powodu czytelności wybrano system $L^*a^*b^*$. Zastosowane urządzenie „Spektrofotometr CM - 2600d posiada dwa pola pomiarowe o średnicy 3 i 8 mm i wyposażone jest w uniwersalną geometrię pomiarową d/0, tzn. światło z wysoko wydajnej ksenonowej lampy błyskowej oświetla mierzoną powierzchnię dyfuzyjnie ze wszystkich kątów przestrzennych przy percepcji poniżej 0 stopni. Sześć wysokoczułych fotodiod krzemowych z filtrami dopasowanymi ściśle do krzywych wrażliwości na barwy rejestruje światło odbite. Wartość pomiaru barwy L^* podaje jasność barwy w zakresie wartości od 0 do 100. Wartości $+a^*/-a^*$ odzwierciedlają tony barw w skali czerwień – zieleni (pozytywne wartości w kierunku czerwieni, negatywne wartości w kierunku zieleni), wartości $+b^*/-b^*$ odzwierciedlają tony barw w skali żółty – niebieski (pozytywne wartości w kierunku żółtego, negatywne wartości w kierunku niebieskiego).

4. Wnioski

Zachowanie dziedzictwa kulturowego dla przyszłych pokoleń jest jednym z najważniejszych zadań społeczeństw. Konserwacja bezcennych obiektów jest procesem dostarczającym konserwatorom wielu trudnych zagadnień komplementarnych, a ich oczyszczanie jest jednym z krytycznych etapów tego procesu. Zasadniczą przyczyną zainteresowania laserami w konserwacji, szczególnie przy usuwaniu nawarstwień wtórnych jest mnogość zalet tej metody w porównaniu z metodami konwencjonalnymi. Ogromna różnorodność rodzaju nawarstwień, jak również szeroki wachlarz wyboru parametrów wiązki laserowej (długości fali, gęstości energii), dostarcza jedynej w swoim rodzaju najwyszczególniejszej, jak do tej pory technologii usuwania nawarstwień obcych z dzieł sztuki i z obiektów architektonicznych.

Laserowa technika usuwania warstw wierzchnich – zanieczyszczających powierzchnię dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze (np. nawarstwień, przemalowań, poślókłych werniksów lub czarnych skorup) za pomocą promieniowania laserowego jest metodą nowoczesną. Oferuje ona szereg niespotykanych do tej pory zalet w porównaniu do metod tradycyjnych (mechanicznych i chemicznych) [4, 6].

Zebrałe dane stanowią bazę służącą do porównań zachowania się barw trakcie następnych sesji pomiarowych w latach przyszłych, a także do dalszych porównań w miarę upływu czasu. Ponadto, poprzez pomiary barw w pewnych odstępach czasowych za pomocą kolorymetru lub spektrofotometru, możliwe jest obiektywne porównanie różnych barw, stwierdzenie kwantytatywnych ich zmian i dokładne zdefiniowanie szybkości zaniku barwy pierwotnej – wyjściowej w miarę upływu czasu.

L i t e r a t u r a

- [1] A s m u s J.F., M u r p h y C.G., M u n k W.H., *Studies on the Interaction of Laser Radiation with Art. Artifacts*, „Proceedings of SPIE”, 1973, Vol. 41, s.19-27.
- [2] K o s s A., M a r c z a k J., *Czyszczenie Laserem Wybranych Powierzchni Kamiennych Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie*, Ochrona Zabytków, Vol.1 (204), LII, s.39-44, (1999).
- [3] M a r c z a k J., *Zagadnienie wykorzystania ablacji laserowej w usuwaniu wtórnych nawarstwień z powierzchni dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze*, Ochrona Zabytków Nr 3, s.233-252, (2001).
- [4] K o s s A., M a r c z a k J., *Application of Lasers in Conservation of Monuments and Works of Art*, ISBN 83-922954-0-4, (2005).
- [5] M a r c z a k J., *Analiza i Usuwanie Nawarstwień Obcych z Różnych Materiałów Metodą Ablacji Laserowej*, stron 226, ISBN: 83-88442-94-5 (2004).
- [6] K o s s A., M a r c z a k J., *Zalety i wady oczyszczania promieniowaniem laserowym dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze – praktyka konserwatorska, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych - Praca zbiorowa*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, ISBN 83-7125-151-3, s.393-404 (2006).